

УДК 691.539.216

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ЗЕРНОВОГО СОСТАВА ЗАПОЛНИТЕЛЯ ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА

*В.В. Белов, М.А. Смирнов, И.В. Образцов*

Существует много предложений по назначению оптимального зернового состава композиций для изготовления тяжелых бетонов, который должен обеспечивать их минимальную пустотность, определяемую возможностью плотной укладки зерен материала. По аналогии с плоской задачей при пространственном расположении зерен одинакового размера и шарообразной формы за наиболее плотную упаковку, без строгого математического обоснования, принимают гексагональную упаковку, для которой характерны 12 контактов у частицы. В то же время отмечается [1], что до сих пор математически не доказано, что это максимально достижимая плотность. Наиболее плотная упаковка для ограниченного набора фракций шарообразных частиц достигается при плотной гексагональной упаковке с 4-модальным распределением зерен с размерами  $D$ ,  $(\sqrt{2}-1)D$ ,  $((\sqrt{6}/2)-1)D$ ,  $((2\sqrt{3}/3)-1)D$  в количественном соотношении 1:1:1:1. При этом пустотность составит 0,188 или 18,8%. При этом также следует считать, что с точки зрения статистики гексагональная упаковка частиц крайне неустойчива, и технологическая ее реализация крайне затруднена. Более устойчивой является гексагонально-призматическая упаковка частиц, и наиболее вероятными и технологически осуществимыми являются многомодальные кубическая или гексагонально-призматическая упаковки [2].

В работе [3] находили зависимости насыпной плотности при свободной засыпке и засыпке в условиях встряхивания для многофракционных смесей кварцевого песка. Сравнение результатов эксперимента и расчетов оптимального состава сыпучей системы по известным моделям упаковки показало, что наибольшее приближение к экспериментальному оптимальному зерновому составу из критерия максимальной насыпной плотности по результатам планированного эксперимента получено по расчетам на основе формулы Функа/Дингера с коэффициентом распределения  $n$ , равным 0,5:

$$G_{\text{пр}} = 100 \frac{X^n - D_{\min}^n}{D_{\max}^n - D_{\min}^n}, \quad (1)$$

где  $G_{\text{пр}}$  – проход частиц, %, через сито размером  $X$ , мм;  $D_{\max}$  – наибольшая крупность зерна в смеси, мм;  $D_{\min}$  – наименьшая крупность зерна в смеси, мм.

В то же время показано [3], что уравнения оптимальных кривых просеивания дают только приблизительный состав максимальной упаковки зерен заполнителя, что можно объяснить различной формой зерен реальной сыпучей системы. Указанные уравнения описывают «идеальную» кривую просеивания для систем с шарообразной формой зерен и не учитывают возможных отклонений от этой формы для реальных систем. Считается, что учет данного фактора может быть выполнен с помощью коэффициента формы зерна, который определяется как отношение площади поверхности шара  $\Phi_{\text{шар}}$  к площади поверхности зерна  $\Phi_z$  равного объема [4]. Коэффициент формы шара равен единице. При этом чем сильнее форма зерен отличается от идеальной сферической формы, тем большую долю в зерновом составе должна занимать меньшая фракция [5].

Экспериментальная проверка моделей упаковки реальных дисперсных систем наряду с теоретическим анализом и обобщением позволила в данной работе предложить усовершенствованную формулу «идеальной» или эталонной кривой просеивания, полученную на основе формулы Функа/Дингера с учетом коэффициента формы частиц. Эта формула имеет вид:

$$\frac{G_{np}}{100} = \alpha + (1 - \alpha) \frac{X^{0,5} - D_{\min}^{0,5}}{D_{\max}^{0,5} - D_{\min}^{0,5}}. \quad (2)$$

Графики зависимостей эталонных кривых просеивания, построенные как по уравнению Функа/Дингера при двух значениях коэффициента распределения (0,5 и 0,37), так и по предлагаемому уравнению также при этих двух значениях коэффициента распределения. Видно, что коэффициент  $n$  оказывает влияние в основном на содержание средних фракций, и на основании экспериментов можно утверждать, что более точные результаты получаются при использовании этого коэффициента, равного 0,5, показаны на рис. 1

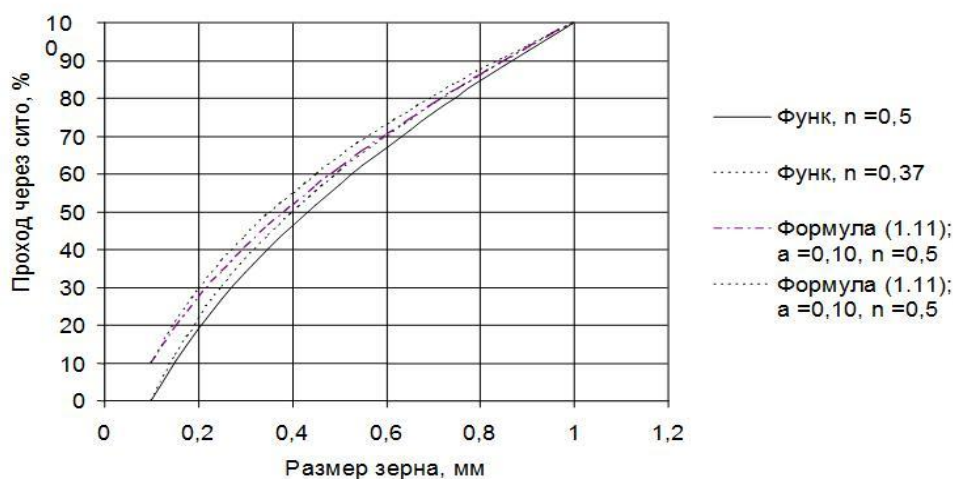


Рис. 1. Сравнение расчетов оптимального состава сыпучей системы по известным моделям упаковки и предложенным в работе

Получение «эталонной» или «идеальной» кривой гранулометрического состава минеральной части композита или его экспериментальная оптимизация на основе использования специально подготовленных «узких» фракций при всех достоинствах этого метода предполагает тщательную классификацию исходных сырьевых компонентов, а также проведение соответствующих испытаний, что определяет большую трудоемкость и стоимость этого способа.

Смешивание реальных сырьевых компонентов в оптимальном соотношении с целью приближения гранулометрического состава смеси к эталонной кривой или непосредственно из условия достижения наибольшей плотности упаковки проще и чаще применяется на практике, хотя при традиционных способах подбора не дает гарантии достижения наилучшего результата.

Как правило, для получения во втором способе кривой просеивания смеси заполнителей, близкой к идеальной, недостаточно не только одного, но даже и нескольких природных минеральных компонентов ввиду того, что кривые просеивания каждого материала отличаются одна от другой и далеки от «идеальной кривой». Поэтому использование традиционных методик подбора оптимального состава сырьевой смеси, применяемых, например, в технологии бетона и заключающихся в нахождении путем смешивания наилучшего соотношения между крупными и мелкими заполнителями, которое обеспечивает минимальную пустотность их смеси, оказывается явно недостаточным. Возможно использование методик подбора состава минеральной части композита, применяемых в технологии асфальтобетона и подразумевающих наличие как минимум трех компонентов: щебня, песка и минерального порошка, а при необходимости – и большего числа компонентов, например, двух видов песка вместо одного. Однако методики подбора состава минеральной части конгломератов, применяемые в настоящее время и описанные в соответствующих справочных и учебных пособиях, основаны на

ручном подборе соотношения компонентов, заведомо не обеспечивающем наилучшего результата и весьма трудоемком.

Предлагается определять оптимальное соотношение различных компонентов известного фракционного состава с целью приближения гранулометрического состава смеси заполнителей строительных конгломератов к эталонной кривой на основе модифицированного уравнения Функа/Дингера (2) по аналогии с методикой, описанной в работе [6] применительно к методу проектирования оптимального гранулометрического состава наполнителей сухих строительных смесей. С этой целью разработана компьютерная программа, позволяющая быстро и с заданной степенью точности оптимизировать зерновой состав строительной смеси из любого количества (до 100) компонентов. При этом имеется возможность выбора и использования в программе помимо модифицированного уравнения Функа/Дингера нескольких других «идеальных» кривых просеивания (Гуммеля, Фуллера, Боломея), что существенно расширяет возможности данной программы. Достоинствами данного метода расчета являются: быстрота выполнения вычислительных операций и проверки условия оптимальности, а также возможность нахождения «наилучшего» решения из комбинации возможных, путем автоматического уменьшения погрешности. На разработанную и описанную выше программу «Подбор оптимальной гранулометрии заполнителя» версии 2.0 получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010617267 (зарегистрировано 29.10.2010 г.).

Для установления адекватности компьютерного расчетного метода подбора оптимального зернового состава сырьевых компонентов определялись насыпные плотности заполнителей и их смесей, а также значения прочности образцов мелкозернистого бетона с применением пластифицирующей добавки. В качестве исследуемых материалов применялись пробы трех видов речного песка различных месторождений (разной крупности) и портландцемент М500-Д0. На подготовительном этапе исследований лабораторным путем были установлены гранулометрические составы заполнителя, крупность, пустотность; определены свойства цемента: тонкость помола, сроки схватывания и нормальная густота. Полученные данные ситового анализа были занесены в разработанную программу, и был произведен расчет оптимального соотношения песков при разных параметрах «идеальных» гранулометрических зависимостей.

Согласно автоматизированному расчету, наиболее оптимальному составу заполнителя соответствовали соотношения песков в смеси № 3: 19%: 2%: 79%. Для проверки адекватности расчетного метода варьировались соотношения компонентов относительно полученных, и исследовались параметры смесей. Рассчитанный состав песчаной смеси (с номером 0 в табл. 1), а также для сравнения близкие составы (с номерами 1, 2 и 3 в табл. 1) были приготовлены в гравитационном смесителе для перемешивания сухих компонентов. За критерий оптимальности была принята пустотность заполнителя. Смесь с оптимальным соотношением компонентов обладает минимальной пустотностью – 28,7% (рис. 2, табл. 1). При увеличении содержания песка № 1 (самый мелкий песок) пустотность системы увеличивается.

Таблица 1. Проверка адекватности расчетного метода

№ п/п	Соотношения песков $\Pi_1:\Pi_2:\Pi_3$ %	Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>			Среднее значение насыпной плотности, г/см <sup>3</sup>	Пустот- ность, %
		Замер 1	Замер 2	Замер 3		
0	19 : 2 : 79	1,885	1,890	1,891	1,889	28,7
1	21 : 0 : 79	1,850	1,870	1,865	1,862	29,7
2	17 : 4 : 79	1,880	1,885	1,880	1,882	29,0

3	18 : 1 : 81	1,885	1,890	1,890	1,888	28,8
---	-------------	-------	-------	-------	-------	------

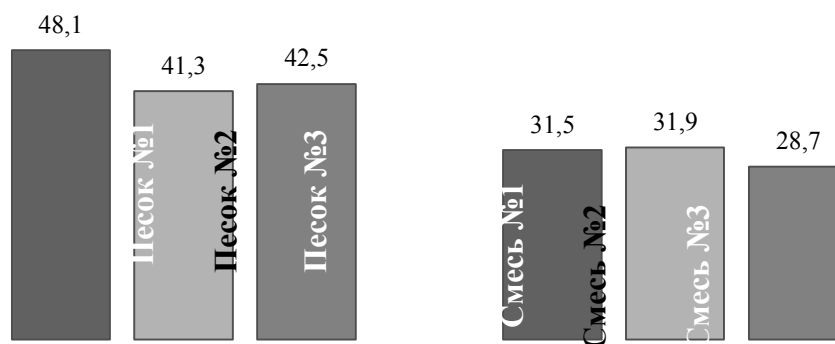


Рис. 2. Диаграмма сравнения пустотностей исходных компонентов и рассчитанных смесей

Для дальнейших экспериментов был принят оптимальный состав: 19% : 2% : 79%. На основе оптимизированной смеси заполнителя были приготовлены опытные образцы-кубики 70 x 70 x 70 мм из мелкозернистого бетона с применением пластифицирующей добавки Melflux (табл. 2).

Таблица 2. Составы исследуемых бетонных смесей

Номер состава	Водоцементное отношение	Песчаноцементное отношение	Расплав конуса, мм	Добавка
Состав № 1 (контрольный, на песке № 1)	0,5	1:3	120	Отсутствует
Состав № 2 (песок № 1, добавка)	0,323	1:2	120	Melflux (0,1 % от массы цемента)
Состав № 3 (оптимизированная смесь песков, добавка)	0,311	1:2	120	Melflux (0,1% от массы цемента)
Состав № 4 (оптимизированная смесь песков, без добавки)	0,319	1:2	120	Отсутствует

Правильное соотношение компонентов зернового состава заполнителя снижает пустотность системы и благополучно влияет на прочность получаемого бетона (табл. 3). Наибольшая прочность наблюдается в серии с оптимизированным гранулометрическим составом заполнителя. Применение одного песка в качестве заполнителя занижает прочностные показатели вследствие повышенной пустотности зерновой структуры. Разработанное в ходе исследовательской работы программное обеспечение позволяет расчетным способом моделировать различные составы, приближая их к оптимальному – описанному формулой «идеальной» кривой.

В результате эксперимента получены образцы мелкозернистого бетона со средней прочностью на сжатие 52,7 МПа. Применение пластифицирующей добавки улучшило удобоукладываемость бетонной смеси, снизило водоцементное отношение, но дало некоторое снижение прочности бетона.

Таблица 2.5. Прочностные характеристики полученных образцов

Номер состава	Предел прочности бетона на сжатие в возрасте 12 суток на образцах 70 x 70 x 70 мм, МПа	Предел прочности бетона на сжатие в возрасте 28 суток, МПа
---------------	--	--

Состав № 1 (контрольный, на песке № 1)	10,2	13,7
Состав № 2 (песок № 1, добавка)	21,7	29,1
Состав № 3 (оптимизированная смесь песков, добавка)	33,9	45,5
Состав № 4 (оптимизированная смесь песков, без добавки)	39,3	52,7

#### Библиографический список

1. Слоэн, Н. Дж. А. Упаковка шаров / Н.Дж. Слоэн // В мире науки: Scientific American. Издание на русском языке, 1984. № 3. С. 72–82.
2. Мамыркулов, М.И. Математическое моделирование структуры пористых материалов / М.И. Мамыркулов [и др.]. // Популярное бетоноведение, 2008. № 4. С. 77–78.
3. Белов, В.В. Оптимизация гранулометрического состава композиций для изготовления безобжиговых строительных конгломератов / В.В. Белов, М.А. Смирнов // Вестник Центрального регионального отделения РААСН. Воронеж: РААСН, ВГАСУ, 2010. Вып. 9. С. 65–72.
4. Удодов, С.А. Применение пористого заполнителя в отделочных составах для ячеистого строительного композита. Часть 1 / С.А. Удодов, В.Ф. Черных // Сухие строительные смеси, 2008. № 2. С. 68–70.
5. Стрелов, К.К. Теоретические основы технологии огнеупорных материалов / Стрелов К.К., Кашеев И.Д. М.: Металлургия, 1996. 608 с.
6. Статюха, Г.А. Оптимизация гранулометрического состава наполнителей для сухих строительных смесей / Г.А. Статюха, Н.Е. Телицына, И.В. Суруп // Хімічні технології і екологія. Вісник ЧДТУ. 2008. № 4. С. 57 – 61.